

# **Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)**

International application number: PCT/EP05/002989

International filing date: 21 March 2005 (21.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE

Number: 10 2004 013 618.1

Filing date: 19 March 2004 (19.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 26 April 2005 (26.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

18. April 2005



EPOS | 2989

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 10 2004 013 618.1

**Anmeldetag:** 19. März 2004

**Anmelder/Inhaber:** YXLON International Security GmbH,  
22419 Hamburg/DE

**Bezeichnung:** Röntgenanordnung, Flüssigmetallanode für eine  
Röntgenquelle sowie magnetohydrodynamische  
Pumpe hierfür

**IPC:** H 01 J, H 02 K

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 9. April 2005  
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag

Siegh

Röntgenanordnung, Flüssigmetallanode für eine Röntgenquelle  
sowie magnetohydrodynamische Pumpe hierfür

5 Die Erfindung befasst sich mit einer magnetohydrodynamischen  
Pumpe für eine Flüssigmetallanode einer Röntgenquelle, mit  
einer Röntgenanordnung sowie mit einer Flüssigmetallanode für  
eine Röntgenquelle mit einem Flüssigmetall, das sich in einer  
10 Leitung befindet, wobei ein Teil der Leitung als Fokusbereich  
ausgebildet ist, und mit einer Pumpe zum Umwälzen des  
Flüssigmetalls in der Leitung sowie mit einer Kühlung für das  
Flüssigmetall.

Seit kurzem ist es bekannt, Röntgenstrahlen nicht über eine  
15 feste Metallanode, die mit Elektronen beschossen wird, zu  
erzeugen, sondern mit einer Flüssigmetallanode. Diese  
Technologie wird LIMAX (Liquid Metal Anode X-ray) genannt.  
Eine solche Flüssigmetallanode benötigt für ihren Betrieb die  
folgenden Komponenten. In einer Leitung befindet sich ein  
20 Flüssigmetall, das eine hohe, mittlere Atomzahl aufweisen  
muss, um eine gute Röntgenausbeute beim Beschuss mit  
Elektronen zu erzielen. In die Leitung ist um den  
Fokusbereich herum ein Anodenmodul eingesetzt, in dem der  
Elektronenstrahl auf das Flüssigmetall auftrifft und die  
Röntgenstrahlung erzeugt wird. An dieser Stelle muss das  
Anodenmodul so ausgebildet sein, dass es nur eine geringere  
Wechselwirkung mit den durch es hindurchtretenden Elektronen  
aufweist. Dies wird regelmäßig mit einem sogenannten  
Elektronenfenster erreicht, in dem die hindurchtretenden  
25 Elektronen nur geringfügig abgebremst werden. Um die im  
Fokusbereich entstehende Wärme abzuführen, wird eine Pumpe  
verwendet, die das Flüssigmetall durch die Leitung und somit  
auch den Fokusbereich umwälzt. Wird ein geschlossener  
Kreislauf des Flüssigmetalls verwendet, wird über einen  
30 Wärmetauscher eine Abkühlung des aufgeheizten Flüssigmetalls  
erreicht. Aufgrund der vorgegebenen Rahmenbedingungen ist es  
– wie oben schon aufgeführt – nötig, dass das Flüssigmetall  
35

eine hohe, mittlere Atomzahl aufweist und darüber hinaus einen mittleren Schmelzpunkt hat. Des Weiteren muss die Flüssigmetallanode äußerst kompakt aufgebaut sein. Es ergeben sich somit für die Gesamtheit der vorbezeichneten einzelnen 5 Teile der Flüssigmetallanode bezügliche ihrer Interaktionen starke Beschränkungen, da die einzelnen Teile gut zusammenpassen müssen. Dies gilt insbesondere auch für die Pumpe zum Umwälzen des Flüssigmetalls.

10 Aufgabe der Erfindung ist es, einzelne Teile einer Flüssigmetallanode beziehungsweise ein Gesamtsystem zur Verfügung zu stellen, das eine gute Arbeitsweise der Flüssigmetallanode ermöglicht, wobei die Einzelteile der Flüssigmetallanode gut aufeinander abgestimmt sind.

15 Die Aufgabe wird durch eine magnetohydrodynamische Pumpe mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Um besonders gut und sicher im ausgeschalteten Zustand transportiert werden zu können, muss das Flüssigmetall einer erfindungsgemäßen 20 Flüssigmetallanode bei Zimmertemperatur fest sein. Im Betrieb dagegen muss das Flüssigmetall flüssig sein. Dadurch ergibt sich das Problem, dass zwischen dem Betriebsmodus und dem Ruhemodus eine Verflüssigung beziehungsweise Erstarrung des Flüssigmetalls erfolgen muss, was entweder über Wärm- und Kühlelemente an der Leitung der Flüssigmetallanode geschehen kann oder erfindungsgemäß durch unterschiedliche Moden im Betrieb der magnetohydrodynamischen Pumpe. Durch den Auftaumodus wird das im Ruhemodus und bei Zimmertemperatur feste Flüssigmetall in der Leitung geschmolzen. Dagegen liegt 30 im Betriebsmodus ein geschmolzenes Flüssigmetall vor, das durch die Leitung gepumpt wird. In diesem Betriebsmodus erfolgt die Erzeugung von Röntgenstrahlen.

35 Vorteilhafterweise wird im Auftaumodus der Motor der Pumpe ständig abwechselnd an- und ausgeschaltet. Dadurch werden im festen Flüssigmetall Wirbelströme induziert, die sich graduell verteilen und zu einer ohmschen Erwärmung des

Flüssigmetalls führen. Dies wird dann so lang fortgesetzt,  
bis das gesamte Flüssigmetall geschmolzen ist.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht  
5 vor, dass im Auftaumodus über einen Sensor erfasst wird, ob  
der flüssige Zustand des Flüssigmetalls erreicht ist. Dadurch  
kann sehr exakt eine möglichst frühzeitige Umschaltung vom  
Auftaumodus in den Betriebsmodus erfolgen, nachdem das  
10 gesamte Flüssigmetall geschmolzen wurde und sich somit im  
flüssigen Zustand befindet.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht  
vor, dass ein dritter Modus als Hochfahrmodus vorhanden ist,  
in dem die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe gesteigert  
15 wird. Dadurch wird ein langsames graduell ansteigendes  
Umwälzen des geschmolzenen Flüssigmetalls erreicht und die  
Pumpe muss nicht übermäßig und schlagartig ihre volle  
Leistung erbringen. Besonders bevorzugt geschieht dies  
dadurch, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe  
20 gesteigert wird, bis das Flüssigmetall seine normale  
Flussgeschwindigkeit aufweist.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht  
vor, dass ein vierter Modus als Herunterfahrmodus vorhanden  
ist, in dem nach der Erzeugung von Röntgenstrahlen die  
Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe stufenweise verringert  
wird. Dadurch wird vermieden, dass sich in der Leitung  
Druckwellen bilden, die beispielsweise zu einem Zerbersten  
des Elektronenfensters im Fokusbereich führen können. Damit  
30 wird die gesamte Flüssigmetallanode in ihrer Lebensdauer  
erheblich erhöht. Bevorzugt wird die stufenweise Verringerung  
der Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe erst dann vorgenommen,  
wenn die Temperatur des Flüssigmetalls unter einen  
vorgebbaren Schwellenwert sinkt, der insbesondere weniger als  
35 50 °C oberhalb des Schmelzpunkts des Flüssigmetalls liegt.

Des Weiteren wird die Aufgabe durch eine Flüssigmetallanode für eine Röntgenquelle mit den Merkmalen des Patentanspruchs 9 gelöst. Die hierzu eingesetzte erfindungsgemäße Pumpe gemäß den vorstehenden Ausführungen ist besonders gut für eine 5 Flüssigmetallanode geeignet.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass als Flüssigmetall eine Bi-Legierung insbesondere BiPb oder BiPbInSn, verwendet wird. Dies hat zum einen den 10 Vorteil, dass keine quecksilberhaltigen Verbindungen verwendet werden müssen, die aus Gesundheitsgründen in vielen Staaten mittlerweile verboten sind. Die genannten Bi-Legierungen weisen neben ihrer hohen mittleren Atomzahl auch einen Schmelzpunkt auf, der im Ruhemodus ein Erstarren des 15 Flüssigmetalls gewährleistet. Der Schmelzpunkt von BiPb liegt bei 125°C und der von BiPbInSn bei 55,5°C. Besonders bevorzugt liegt der Gewichtsanteil des Bi in der BiPb-Legierung zwischen 50 und 60 Gew.%, insbesondere bei 55,5 20 Gew.%, und der Rest ist Pb. Bei einer Verwendung einer BiPbInSn-Legierung ist es in der Regel besonders bevorzugt, wenn die BiPbInSn-Legierung einen Anteil Bi von 49,4 Gew.%, Pb von 18,8 Gew.%, In von 21,0 Gew.% und Sn von 11,6 Gew. % aufweist.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Leitung aus Molybdän ist. Da Bismut-Legierungen Stahlrohre korrodieren, wenn die Temperatur der Bismut-Legierung im Bereich einiger hundert Grad liegt – was bei einem Beschuss mit Elektronen im Fokusbereich während des 30 Betriebs normal ist – wird dies bei der Verwendung einer Molybdän-Leitung vermieden.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass das Anodenmodul vollständig aus Molybdän ist und ein Elektronenfenster darin eingesetzt ist, das aus 35 lichtdurchlässigem kubischen Bornitrid – T-cBN – besteht. Dadurch wird gewährleistet, dass durch die flüssige Bismut-

Legierung auch im Fokusbereich keine Korrosion der Leitung erfolgt. Das Elektronenfenster, das regelmäßig mit dem Fokusbereich verlötet ist, weist sehr ähnliche Wärmeausdehnungskoeffizienten wie Molybdän auf, die jeweils 5 im Bereich von  $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  liegen. Dadurch werden bei einer Erhitzung Zugspannungen vermieden, die das Elektronenfenster zum Springen bringen könnten. Außerdem weist das T-cBN eine hohe Wärmeleitfähigkeit von  $300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  auf. Besonders bevorzugt ist die Dicke des Elektronenfensters  $40\mu\text{m}$ .

10 Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Kühlung ein Querstrom-Wärmetauscher in Minikanalbauweise ist. Damit ist auch bei geringem Platz für die gesamte Flüssigmetallanode eine gute Kühlung des heißen 15 Flüssigmetalls möglich.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden anhand 20 des näher in der Figur dargestellten Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Flüssigmetallanode beschrieben. Die einzige Figur zeigt:

Eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Flüssigmetallanode inklusive Elektronenquelle.

In der Figur ist eine erfindungsgemäße Flüssigmetallanode 1 schematisch dargestellt, wie sie in Relation zu einer Kathode 9 angeordnet ist. Die Kathode 9 ist an einem Hochspannungsisolator 11 angebracht und dient zur Erzeugung eines Elektronenstrahls 10, der auf die Flüssigmetallanode 1 trifft und dort zur Erzeugung von Röntgenstrahlen verwendet 30 wird.

Bei vielen Anwendungen im Bereich der zerstörungsfreien Analyse und der Sicherheitsüberwachung von Gepäckstücken ist 35 es notwendig, dass die Röntgenquelle eine Röntgenstrahlung über eine beachtliche Zeitspanne, teilweise über mehrere Stunden, erzeugt. Deswegen ist es bei Flüssigmetallanoden 1

notwendig, dass das Flüssigmetall 2 kontinuierlich durch die Leitung 3 der Flüssigmetallanode 1 zirkuliert. Dazu weist sie eine Pumpe 5 auf, die das Flüssigmetall 2 in der Leitung 3 umwälzt. Darüber hinaus ist auch eine Kühlung 6 nötig, um das Flüssigmetall 2 abzukühlen, welches im Fokusbereich 4 – wo der Elektronenstrahl 10 auf die Flüssigmetallanode 1 trifft – stark erwärmt wird. Des Weiteren ist es nötig, dass die Röntgenquelle und somit auch die Flüssigmetallanode 1 problemlos und sicher von einem Ort zu einem anderen Ort transportiert werden kann, ohne dass für den Betrieb wesentliche Teile kaputt gehen. Hierbei ist insbesondere an ein Elektronenfenster 8 gedacht, durch welches der Elektronenstrahl 10 im Anodenmodul 15 zum Flüssigmetall 2 vordringt. Bei einer Verwendung von Potentialen im Bereich von 200 kV wird normalerweise ein gegenpoliger Hochspannungsgenerator verwendet, in dem das Gehäuse auf Erdpotential gehalten wird, aber die Flüssigmetallanode 1 und die Kathode 9 symmetrisch auf entgegengesetzten Potentialen bezüglich des Erdpotentials gehalten werden. Dadurch ist es nötig, dass die Flüssigmetallanode 1, insbesondere ihre Leitung 3, sehr kompakt ausgeführt ist, damit sie leicht in die auf dem negativen Hochspannungspotential gehaltenen Terminal des gegenüberliegenden Hochspannungsgenerators montiert werden kann.

Dafür ist es nötig, die Flüssigmetallanode 1 mit Komponenten auszugestalten, die im Folgenden im Einzelnen näher beschrieben werden.

Um eine hohe Ausbeute an Röntgenstrahlen zu erhalten, muss ein Flüssigmetall 2 mit einer hohen Atomzahl verwendet werden. Das früher bevorzugte Quecksilber kann aufgrund seiner gesundheits- und umweltgefährdenden Nebenwirkungen nicht mehr verwendet werden. Deshalb wird in der erfindungsgemäßen Flüssigmetallanode 1 eine Legierung verwendet, die Bismut oder Blei enthält. Bevorzugt wird dabei eine Legierung, die sowohl Bismut als auch Blei enthält. Als

besonders bevorzugt wird ein Flüssigmetall aus BiPb verwendet, mit einem Anteil von 55,5 Gew.% Bi und den Rest Pb. Diese Legierung weist einen Schmelzpunkt von 125°C auf. Eine andere besonders bevorzugte Legierung ist BiPbInSn mit 5 einem Anteil von 49,4 Gew.% Bi, 18,0 Gew.% Pb, 21,0 Gew.% In und der Rest Sn. Diese Legierung weist einen Schmelzpunkt von 55,5°C auf. Damit ist das verwendete Flüssigmetall 2 bei Raumtemperatur fest und eine Flüssigmetallanode 1 mit einem solchen Flüssigmetall 2 kann sicher transportiert werden, 10 ohne dass die Gefahr besteht, dass das Elektronenfenster 8 bei normalen Vorsichtsmaßnahmen bricht. Darüber hinaus haben die beiden vorgenannten Legierungen den Vorteil, dass sie beim Erstarren ihr Volumen verringern. Damit wird vermieden, dass die Leitung 3, insbesondere das dünne Elektronenfenster 15 8 gesprengt wird, wie dies beispielsweise bei dem sich beim Gefrieren ausdehnenden Wasser der Fall wäre. Darüber hinaus weisen die beiden Ausführungsbeispiele der Legierungen jeweils Blei und Bismut auf, die beide einen hohen Dampfdruck 20 aufweisen. Ein Riss im Elektronenfenster 8 im Betriebsmodus – wenn das Flüssigmetall 2 in flüssiger Form durch die Leitung 3 gepumpt wird – kann dann sehr leicht festgestellt werden, indem die Qualität des Vakuums in der Röntgenröhre überwacht wird.

Bei der Verwendung einer Indium-Legierung als Flüssigmetall 2 kann für die Leitung 3 kein Stahl verwendet werden, da Indium 30 bei einer Temperatur von 100°C – wie dies im Betriebsmodus durchaus der Fall ist – Stahlleitungen korrodiert. Um eine solche Korrosion zu verhindern, wird die Leitung 3 und das gesamte Anodenmodul 15 aus Molybdän gefertigt. Dies hat darüber hinaus den Vorteil, dass es hinsichtlich seines Wärmeausdehnungskoeffizienten auf das weiter unten beschriebene Elektronenfenster 8 hervorragend abgestimmt ist. Darüber hinaus weist eine Leitung 3 aus Molybdän eine geringe 35 magnetische Permeabilität auf, was für die einwandfreie Funktion der Pumpe 5 – wie nachfolgend beschrieben – wichtig ist.

Das Anodenmodul 15 ist in seinem Fokusbereich 4 folgendermaßen ausgebildet. Der Kathode 8 zugewandt weist es ein Elektronenfenster 8 auf. Durch dieses Elektronenfenster 8 tritt der Elektronenstrahl 10, um mit dem Flüssigmetall 2 in Wechselwirkung zu treten und somit Röntgenstrahlen zu erzeugen. Bisher sind als Elektronenfenster 8 entweder dünne Metallfolien aus Wolfram oder Molybdän sowie Diamantfilme bekannt. Die bekannten Metallfolien sind jedoch anfällig für Ermüdungsrisse. Die Diamantfilme haben den Nachteil, dass sie in ihrem Wärmeausdehnungskoeffizienten – der bei circa  $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  liegt – einen sehr großen Unterschied zu dem Material des Anodenmoduls 15 – nämlich Molybdän mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von  $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  – aufweist. Dieser Unterschied führt zu Spannungen im Elektronenfenster 8, da es normalerweise bei einer Temperatur von  $1.100^\circ\text{C}$  mit dem Anodenmodul 15 verlötet ist. Dadurch ergibt sich eine äußerst unvorteilhafte Verkürzung der Lebensdauer und eine hohe Druckempfindlichkeit des Fokusbereichs 4. Im Ausführungsbeispiel wird deswegen ein Elektronenfenster 8 verwendet, das aus einem T-cBN besteht, das in einer ähnlichen Art wie ein Kühlkörper für eine Hochleistungslaseranode verwendet wird. Das T-cBN besitzt gegenüber dem oben genannten Elektronenfenster 8 den Vorteil einer hohen Wärmeleitfähigkeit im Bereich von  $300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  in Verbindung mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von  $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Dieser Wärmeausdehnungskoeffizient stimmt mit dem des Molybdän überein, aus dem das Anodenmodul 15 – auch im Bereich des Fokusbereichs 4 – besteht. Um möglichst nur einen geringen Energieverlust und kaum Wechselwirkung des Elektronenstrahls 10 im Elektronenfenster 8 zu erhalten, ist das Elektronenfenster 8 nur  $40\mu\text{m}$  dick.

Das Anodenmodul 15 weist im Fokusbereich 4 in Flussrichtung 7 nacheinander einen Konfusorbereich 12, einen Wechselwirkungsbereich 13 und einen Diffusorbereich 14 auf. Im Konfusorbereich 12 wird ein turbulenter (verwirbelter)

Fluss des Flüssigmetalls 2 erzeugt. Die Verwirbelungen führen dazu, dass im Wechselwirkungsbereich 13 ein guter Wärmetransport der bei der Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl 10 im Flüssigmetall 2 entstehenden Wärme erfolgt. In dem sich anschließenden Diffusorbereich 14 wird die Geschwindigkeit des Flusses ohne große Reibungsverluste wieder auf die normale Größe zurückgeführt.

Aufgrund der Verwendung eines Flüssigmetalls 2, das bei Raumtemperatur fest ist und im Betriebsmodus flüssig, muss es immer vor Betrieb über seinen Schmelzpunkt erhitzt werden, damit eine zufrieden stellende Funktionsweise der Röntgenquelle gewährleistet wird. Dabei kommt der erfindungsgemäßen Pumpe 5 eine wichtige Rolle zu. Neben der klassischen Rolle einer Pumpe 5 – nämlich der Umlaufung des Flüssigmetalls 2 in der Leitung 3 – nimmt diese auch das Schmelzen und Erhitzen des Flüssigmetalls 2 wahr. Schließlich ist aufgrund der nötigen kompakten Bauweise der gesamten Flüssigmetallanode 1 – da sie auf das Kathodenpotential der Röntgenquelle gelegt werden muss – auch eine sehr kompakte Ausführung der Pumpe 5 nötig. Die vorgenannten Eckpunkte werden durch ein kontaktloses Grundprinzip erfüllt, das eine magnetohydrodynamische Kraft verwendet. Mit einer solchen Pumpe 5 kann ein Magnetwechselfeld unter der Verwendung eines Systems von Permanentmagneten erzeugt werden, die auf einer von einem konventionellen kleinen Wechselstrommotor angetriebenen Platte angeordnet sind. Die Vorteile einer solchen magnetohydrodynamischen Pumpe 5, die Dauermagnete nutzt, liegen in einer höheren Effizienz, keinen elektrischen Isolationsproblemen bei hohen Temperaturen, einer einfacheren Konstruktion und einem geringeren Gewicht sowie einer kleineren Abmessung. Wie oben schon ausgeführt, ist die Leitung 3 aus Molybdän, was eine geringe magnetische Permeabilität aufweist. Dadurch ist es möglich, dass die wechselnden Magnetfelder – die durch das Rotieren der Permanentmagneten erzeugt wird, durch die Leitung 3 hindurch

tritt und dadurch im Flüssigmetall 2 eine Kraft induziert.  
Dies ist für den unten beschriebenen Auftaumodus wichtig.

Die Pumpe 5 ist über eine Abschirmung von dem Vakuumsystem  
5 der Röntgenröhre getrennt, so dass keine Wechselwirkung im  
elektromagnetischen System auftritt. Die erfindungsgemäße  
Pumpe 5 weist vier verschiedene Moden auf, nämlich einen  
Auftaumodus, einen Hochfahrmodus, einen Betriebsmodus und  
einen Herunterfahrmodus, die im Folgenden im Einzelnen  
10 beschrieben werden.

Wie oben beschrieben, muss aufgrund seines Schmelzpunktes  
oberhalb der Zimmertemperatur das Flüssigmetall 2 vor der  
Inbetriebnahme der Röntgenquelle erwärmt und geschmolzen  
werden. Um ein möglichst kompaktes System zu erhalten, wird  
15 dies im Ausführungsbeispiel durch die Pumpe 5 miterfüllt. In  
diesem Auftaumodus wird der Heizeffekt dadurch erzeugt, dass  
der Pumpenmotor stoßweise betrieben wird. Wenn ein  
wechselndes Magnetfeld in ein festes Metall induziert wird,  
20 bilden sich aufgrund der magnetohydrodynamischen Kräfte  
Wirbelströme. Da sich das Flüssigmetall 2 in seinem festen  
Zustand nicht bewegen kann, verteilen sich die Wirbelströme  
graduell und führen zu einer ohmschen Erwärmung des in fester  
Form vorliegenden Flüssigmetalls 2. Der stoßweise Betrieb der  
Pumpe 5 führt dazu, dass das schon geschmolzene Flüssigmetall  
2 graduell Wärme auf das noch feste Flüssigmetall 2 abgibt.  
Der Auftaumodus wird beendet, wenn ein Temperaturfühler in  
der Nähe des Fokusbereichs 4 auf dem in Flussrichtung 7  
30 pumpenfernen Ende signalisiert, dass der flüssige Zustand des  
Flüssigmetalls 2 erreicht wurde.

Im Hochfahrmodus wird der Pumpe 5 kontinuierlich elektrische  
Leistung zugeführt und auf das Flüssigmetall 2 übertragen.  
Die an die Pumpe 5 bei der nominellen  
35 Rotationsgeschwindigkeit übertragene elektrische Leitung wird  
gemessen. Wenn keine weitere Änderung in der elektrischen

Leistungsaufnahme erfolgt, hat das Flüssigmetall 2 seine normale Flussgeschwindigkeit erreicht.

Wenn dieser Hochfahrmodus beendet ist, kann der Betriebsmodus 5 gestartet werden. In diesem Modus wird der Elektronenstrahl 10 auf das Flüssigmetall 2 im Fokusbereich 4 zur Erzeugung der Röntgenstrahlung geschossen. Dazu wird Hochspannung an die Röntgenquelle angelegt. Im Betriebsmodus wird auch Kraft auf das Flüssigmetall 2 über die Pumpe 5 übertragen, um 10 Reibungsverluste im Kreislauf zu kompensieren.

Nachdem die Hochspannung der Röntgenröhre abgeschaltet ist und kein Elektronenstrahl 10 mehr auf das Flüssigmetall 2 trifft, ist das Flüssigmetall 2 trotzdem noch stark erhitzt. 15 Die Pumpe 5 arbeitet deswegen noch bei normaler Leistung weiter, bis die Temperatur des Fokusbereichs 4 unter einen vorgegebenen Schwellenwert gefallen ist. Als Schwellenwert wird bevorzugt eine Temperatur genommen, die 50°C über dem Schmelzpunkt des verwendeten Flüssigmetalls 2 liegt. Somit 20 ergibt sich als Schwellenwert bei der Verwendung von BiPb 175°C und bei der Verwendung von BiPbInSn ein Schwellenwert von 105,5°C. Wird dieser Schwellenwert unterschritten, wird die elektrische Leistung der Pumpe schrittweise herabgesetzt, um Druckwellen des Flüssigmetalls 2 innerhalb der Leitung 3 zu vermeiden. Dadurch wird eine erhebliche Verlängerung der Lebenszeit der Flüssigmetallanode 1 erreicht, da insbesondere 25 das sehr dünne druckanfällige Elektronenfenster 8 keinen Schaden nimmt.

30 Als letztes Element der Flüssigmetallanode 1 wird die Kühlung 6 beschrieben. Es handelt sich hierbei um einen kompakten Querstrom-Wärmetauscher in Minikanalbauweise aus Molybdän. Der hydraulische Durchmesser der Kanäle beträgt zwischen 0,3 und 3 mm. Das heiße Flüssigmetall 2 wird in dem nur geringen 35 zur Verfügung stehenden Volumen von einigen cm<sup>3</sup> gekühlt. Im Sekundärkühlkreislauf wird ein Öl verwendet, das hochspannungsresistent und hitzebeständig bei mittleren

Temperaturen ist so dass keine elektrischen Durchschläge auftreten. Solche Wärmetauscher sind in der Literatur bekannt und werden deswegen im Folgenden nicht näher beschrieben.

5 Der erfindungsgemäße Röntgenstrahler weist somit eine Kathode 9 zur Emission eines Elektronenstrahls 10 auf, der beim Auftreffen auf die Flüssigmetallanode 1 zur Röntgenstrahlenemission führt.

10

### Bezugszeichenliste

- 1 Flüssigmetallanode
- 2 Flüssigmetall
- 3 Leitung
- 4 Fokusbereich
- 5 Pumpe
- 6 Kühlung
- 7 Flussrichtung
- 8 Elektronenfenster
- 9 Kathode
- 10 Elektronenstrahl
- 11 Hochspannungsisolator
- 12 Konfusorbereich
- 13 Wechselwirkungsbereich
- 14 Diffusorbereich
- 15 Anodenmodul

### Patentansprüche

1. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) für eine Flüssigmetallanode (1) einer Röntgenquelle, dadurch gekennzeichnet, dass sie in mindestens zwei Moden betreibbar ist, wobei der erste Modus ein Auftaumodus ist, in dem das Flüssigmetall (2) in einer Leitung (3) der Flüssigmetallanode (1) geschmolzen wird, der zweite Modus ein Betriebsmodus ist, in dem das Flüssigmetall (2) durch die Leitung (3) gepumpt wird und die Erzeugung von Röntgenstrahlen erfolgt.
2. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) gemäß Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Motor der Pumpe (5) ständig abwechselnd an- und ausgeschaltet wird.
3. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) gemäß einem der Patentansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass im Auftaumodus über einen Sensor erfasst wird, ob der flüssige Zustand des Flüssigmetalls (2) erreicht ist.
4. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) gemäß einem der Patentansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass ein dritter Modus als Hochfahrmodus vorhanden ist, in dem die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe (5) gesteigert wird.
5. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) gemäß Patentanspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe (5) gesteigert wird, bis das Flüssigmetall (2) seine normale Flussgeschwindigkeit aufweist.
6. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) gemäß einem der Patentansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass ein vierter Modus als Herunterfahrmodus vorhanden ist, in dem nach der Erzeugung von Röntgenstrahlen die

Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe (5) stufenweise verringert wird.

7. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) gemäß Patentanspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die stufenweise Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe (5) erst erfolgt, wenn die Temperatur des Fokusbereichs (4) unter einen vorgebbaren Schwellenwert sinkt.

10 8. Magnetohydrodynamische Pumpe (5) gemäß Patentanspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwellenwert 50°C über dem Schmelzpunkt des Flüssigmetalls (2) liegt.

15 9. Flüssigmetallanode (1) für eine Röntgenquelle mit einem Flüssigmetall (2), das sich in einer Leitung (3) befindet, wobei ein Anodenmodul (15), im Fokusbereich (4) in die Leitung (3) eingesetzt ist, mit einer Pumpe (5) zum Umlöten des Flüssigmetalls (2) in der Leitung (3) sowie mit einer Kühlung (6) für das Flüssigmetall (2), dadurch gekennzeichnet, dass die Pumpe (5) als eine magnetohydrodynamische Pumpe (5) nach einem der vorstehenden Patentansprüche ausgebildet ist.

20 10. Flüssigmetallanode (1) gemäß Patentanspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass als Flüssigmetall (2) eine Bi-Legierung, insbesondere BiPb oder BiPbInSn, verwendet wird.

30 11. Flüssigmetallanode (1) gemäß Patentanspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Gewichtsanteil des Bi in der BiPb-Legierung zwischen 50 und 60 Gew.%, insbesondere bei 55,5 Gew.%, liegt und der Rest Pb ist.

35 12. Flüssigmetallanode (1) gemäß Patentanspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die BiPb-Legierung einen Anteil Bi von 49,4 Gew.%, Pb von 18,8 Gew.%, In von 21,0 Gew.% und Sn von 11,6 Gew.% aufweist.

13. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 9 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Leitung (3) aus Molybdän ist.

5 14. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Anodenmodul (15) vollständig aus Molybdän ist, in das ein Elektronenfenster (8) eingesetzt ist, das aus lichtdurchlässigem kubischen Bornitrid besteht.

10 15. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 9 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Elektronenfenster (8) eine Dicke von 10 - 80 $\mu$ m, insbesondere von 40 $\mu$ m, aufweist.

15 16. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 9 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Kühlung (6) ein Querstrom-Wärmetauscher im Minikanalbauweise ist.

20 17. Röntgenstrahler mit einer Kathode (9) zur Emission eines Elektronenstrahls (10) und einem beim Auftreffen des Elektronenstrahls (10) Röntgenstrahlen emittierenden Flüssigmetallanode (1) nach einem der Patentansprüche 9 bis 16.

### Zusammenfassung

Die Erfindung befasst sich mit einer magnetohydrodynamischen Pumpe 5 für eine Flüssigmetallanode 1 einer Röntgenquelle. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass sie in mindestens zwei Moden betreibbar ist, wobei der erste Modus ein Auftaumodus ist, in dem das Flüssigmetall 2 in einer Leitung 3 der Flüssigmetallanode 1 geschmolzen wird, der zweite Modus ein Betriebsmodus ist, in dem das Flüssigmetall 2 durch die Leitung 3 gepumpt wird und die Erzeugung von Röntgenstrahlen erfolgt. Darüber hinaus befasst sich die Erfindung mit einer Flüssigmetallanode 1 für eine Röntgenquelle mit einem Flüssigmetall 2, das sich in einer Leitung 3 befindet, wobei ein Anodenmodul 15 im Fokusbereich 4 in die Leitung 3 eingesetzt ist, mit einer Pumpe 5 zum Umwälzen des Flüssigmetalls 2 in der Leitung 3 sowie mit einer Kühlung 6 für das Flüssigmetall 2. Erfindungsgemäß weist eine solche Flüssigmetallanode 1 eine magnetohydrodynamische Pumpe 5 gemäß den obigen Ausführungen auf.

(Figur)



